

Рис. 2. Удельные расходы условного топлива для стенов разогрева ковшей различной емкости и различной конструкции

### Список использованных источников

1. Запольская Е.М., Темлянцев М.В., Костюченко К.Е. Анализ основных направлений повышения энерготехнологической эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей // Вестник РАЕН (Западно-Сибирское отделение). 2013. Вып. 15. С. 128–134.
2. Запольская Е.М., Темлянцев М.В., Костюченко К.Е. Влияние геометрических размеров и емкости сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стенов высокотемпературного разогрева // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2013. № 2(4). С. 28 – 32.
3. Запольская Е.М., Темлянцев М.В., Костюченко К.Е., Матвеев М.В. Исследование эффективности использования кислорода при отоплении стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013. № 6. С. 3–7.
4. Темлянцев М.В., Запольская Е.М., Стерлигов В.В., Темлянцева Е.Н., Дегтярь В.А. Повышение энерготехнологической эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок металлургических ковшей // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии. 2014. № 33. С. 38–44.
5. Матвеев М.В., Темлянцев М.В., Запольская Е.М., Костюченко К.Е. Разработка математической модели тепловой работы стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей // Сб. на-уч. тр. Вестник Горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2013. Вып. 31. С. 31–44.

УДК 621.783.231

**М. В. Иванова, М. Д. Казяев**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## ТЕПЛОВАЯ РАБОТА И КОНСТРУКЦИЯ ПЕЧИ С ШАГАЮЩИМ ПОДОМ ДЛЯ НАГРЕВА МЕДНЫХ СЛЯБОВ

### Аннотация

*Рассмотрена новая конструкция печи с шагающим подом. Печь отапливается природным газом, который сжигается в скоростных горелках. Печь предназначена для нагрева*

медных слывов. Она работает по проходному режиму с равномерным вводом газа и с равномерным отводом продуктов горения через свод по четырем зонам. Дымоудаление осуществляется с помощью дымососа. Произведен расчет тепловой работы печи с выявлением основных показателей ее работы.

**Ключевые слова:** печь с шагающим подом; скоростная горелка; природный газ; медные слывы; тепловой баланс; конвекция; излучение.

### Abstract

*A new design of a walking-hearth furnace is considered. The furnace is heated by natural gas, which is burnt in high-speed burners. The furnace is designed to heat copper slabs. It operates in a continuous mode with a uniform gas inlet and with a uniform withdrawal of combustion products through the arch over four zones. Smoke removal is carried out with the help of a smoke exhaust fan. The calculation of the thermal operation of the furnace with the identification of the main indicators of its operation is made.*

**Keywords:** walking beam furnace; speed burner; natural gas; copper slabs; heat balance; convection; radiation.

На многих металлургических и машиностроительных заводах в Российской Федерации большинство печей для нагрева металла под пластическую деформацию и в целях термообработки выполнены по старым строительным нормам, предусматривающим кирпичную футеровку и горелки устаревших конструкций. Но получение готовой продукции с качественно новыми свойствами привело к потребности совершенствования технологии тепловой обработки изделий, а также к повышению точности нагрева. В настоящее время осуществляется техническое перевооружение печей с использованием новых материалов и топливосжигающих устройств.

В предложенной статье рассматривается схема печи с шагающим подом, выполненная по новым строительным технологиям с применением волокнистой футеровки и скоростных горелок. Печь спроектирована ООО Научно-производственной компанией «УралТермоКомплекс» для ОАО «Кировский завод по обработке цветных металлов». Схема печи показана на рис. 1.

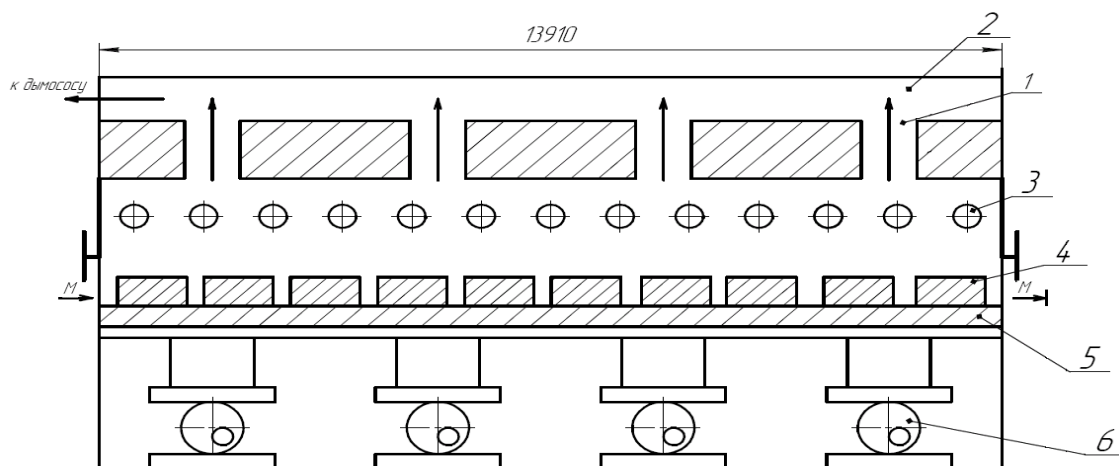


Рис. 1. Схема печи: 1 – дымовые каналы; 2 – общий дымопровод; 3 – горелки ВИС 140; 4 – нагреваемый металл; 5 – под с шагающими балками; 6 – механизм передвижения пода

В печи нагреваются 5-тонные медные слывы, размеры слывов:  $l = 4,5$  м;  $D = 0,63$  м;  $S = 0,2$  м. Заданная производительность печи – 25 т/ч при нагреве медных слывков. Транспортировка металла по рабочему пространству происходит с помощью шагающего пода. Отапливается печь природным газом. Система отопления – боковая. Такая система обеспечивает равномерный нагрев металла. В печи установлены 26 скоростных горелок типа ВИС 140 (рис. 2) немецкой фирмы «Kromschroeder», работающих в импульсном режиме. Суть импульсного режима отопления заключается в том, что тепловая мощность ППП или какой-

либо ее зоны регулируется не изменением расхода топлива, а временем включения и отключения горелок, при этом включенные горелки могут работать при минимальном и максимальном расходе топлива.

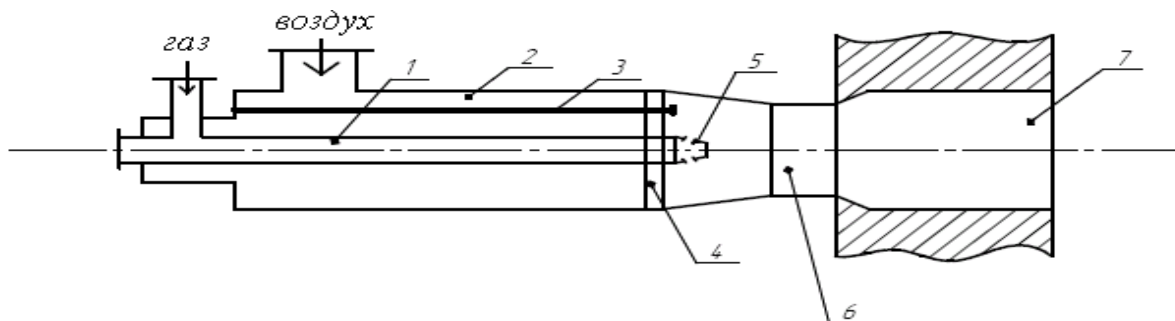


Рис. 2. Конструкция горелки ВИС 140: 1 – газовый корпус; 2 – воздушный корпус; 3 – электрод зажигания; 4 – завихритель; 5 – газовый носик; 6 – насадка; 7 – тоннель

Данные горелки позволяют повысить скорость факела за счет своей конструкции, которая дает возможность смешиваться газу и воздуху внутри самой горелки, что исключает отрыв факела. Скоростной режим работы горелок в рабочем пространстве печи обеспечивает нагрев слывов не только излучением, но и за счет увеличенной конвективной составляющей теплообмена. Интенсификация газодинамики позволяет более точно регулировать температуру печи с одновременным повышением равномерности нагрева.

Расчет нагрева 5-тонных медных слитков производился на основании тепловых потоков в сечениях. Печь условно поделена на четыре равномерные зоны. Для расчета нагрева слывов установлен технологический температурный график (рис. 3).

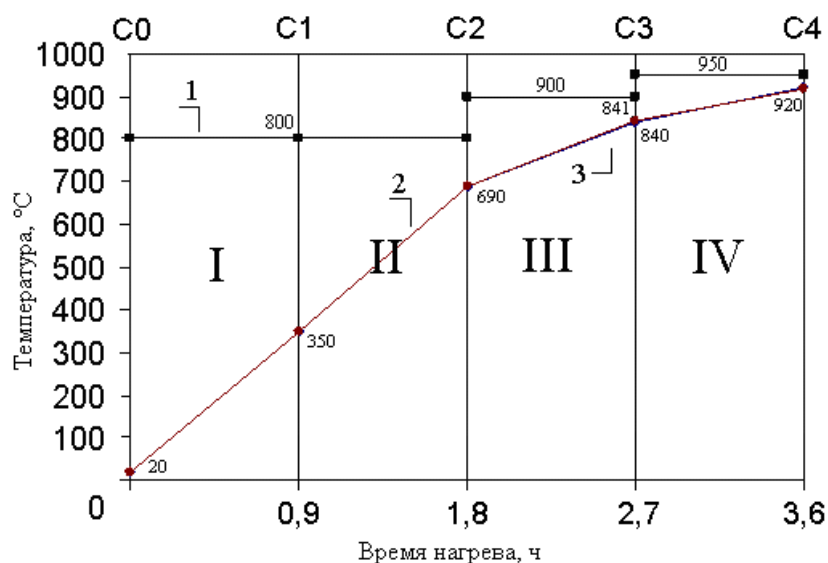


Рис. 3. Изменение температуры печной среды и поверхностей слыва по сечениям: I, II, III, IV – зоны печи; C0, C1, C2, C3, C4 – сечения между зонами печи; 1 – температура печной среды; 2 – температура верхней поверхности слыва; 3 – температура нижней поверхности печи

В соответствии с графиком проведены расчеты нагрева металла.

Плотности тепловых потоков в каждой зоне рассчитывали как сумму отдельных плотностей потоков излучения и конвекции [1]:

$$q_m = q_{мл} + q_{мк} \text{ Вт/м}^2. \quad (1)$$

Плотность теплового потока при теплообмене излучением рассчитали по формуле:

$$q_{мл} = C_{зкм} \left[ \left( \frac{T_z}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 \right] \varphi_{м,ст}, \quad (2)$$

где  $\varphi_{м,ст}$  – угловой коэффициент с металла на футеровку;  $C_{г.к.м}$  – приведенный коэффициент излучения для системы «газ – кладка – металл».

Плотность теплового потока конвекцией рассчитали по формуле:

$$q_{мк} = \alpha_k (t_z - \bar{t}_n), \quad (3)$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент конвективного теплообмена,  $Вт/(м^2 \cdot К)$ ;  $t_z$  – температура газовой среды,  $^{\circ}C$ ;  $\bar{t}_n$  – средняя температура поверхности,  $^{\circ}C$ .

Представленный на рис. 3 график изменения температуры верхней и нижней поверхностей сляба, с одной стороны подтверждает равномерность нагрева этих поверхностей, с другой стороны показывает равномерность прогрева сляба по толщине, т.е. сляб ведет себя как термически тонкое тело.

Для выявления основных показателей работы печи рассчитан тепловой баланс, структура которого представлена в таблице 1.

Таблица 1

Тепловой баланс печи

Приход	кВт	%	Расход	кВт	%
1. Химическая теплота топлива	4141	87,16	1. Полезно затраченная теплота	2674,8	56,3
2. Физическая теплота подогретого воздуха	610,95	12,84	2. Потери теплоты с уходящими газами	1467,5	30,89
			3. Химический недожог	0	0
			4.1 Потери теплоты теплопроводностью через футеровку печи	111,92	2,36
			4.2 Потери теплоты излучением через окна загрузки и выдачи	496,9	10,45
Итого:	4751	100		4751	100

За счет установки скоростных горелок интенсифицируется циркуляция газов и увеличивается доля теплообмена конвекцией, что позволяет повысить плотность теплового потока и равномерность нагрева.

Применение новой футеровки резко снижает потери тепла теплопроводностью. С помощью утилизации тепла уходящих газов, идет хороший подогрев воздуха и 13 % тепла возвращается в печь. На основе этого получаем высокий КПД печи ( $\eta = 56,29 \%$ ), который соответствует печам данного типа.

По сравнению с ранее существующей модернизированной конструкция печи дает возможность нагревать слябы быстрее, чем в толкательной печи с использованием меньшего количества топлива.

Расчетные данные по тепловому балансу (КПД печи и удельный расход топлива) подтверждены реальной эксплуатацией печи, что позволяет сделать вывод о правильно спроектированной конструкции печи, обеспечивающей высокие теплотехнические и технологические показатели.

#### Список использованных источников

1. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Б.Ф. Зобнин, М.Д. Казяев, Б.И. Китаев, В.Г. Лисиенко, А.С. Телегин, Ю.Г. Ярошенко. Учебное пособие для студентов вузов, Изд. 2-е. М.: Металлургия, 1982. – 360 с.

2. Комплексная модернизация нагревательных печей / А.М. Вохмяков, М.Д. Казяев, Б.Н. Арсеев [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. 2009. № 12. С. 56–59.
3. Проходная печь с шагающим подом для нагрева слитков из меди и ее сплавов / Д.И. Спитченко, А.М. Вохмяков, М.Д. Казяев [и др.] // Цветные металлы. 2014. №10. С. 83–87.

УДК 519.6

**Ю. А. Каграманов, В. Г. Тупоногов, П. В. Осипов, Т. С. Курбанов, А. А. Емельянова**  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЯЧЕЙ СЕРООЧИСТКИ СИНТЕЗ-ГАЗА В ПЛОТНОМ СЛОЕ**

### **Аннотация**

*Сорбенты на основе оксида цинка используются для очистки синтез газ от сероводорода до 1–20 ppm, что необходимо для работы газовой турбины в парогазовых циклах с внутрицикловой газификацией твердых топлив [1, 2]. Для расчета системы сероочистки газов в программном пакете Ansys Fluent была разработана компьютерная модель, включающая химические реакции в двухфазных дисперсных потоках. Выполнено моделирование гидродинамики и химических реакций в плотном слое сорбента, получено распределение объемных долей фаз с течением времени, изменение поля скоростей фаз, распределение массовых долей продуктов. Определены средние в интервале температур 300–510 °С кинетические константы реакции поглощения сероводорода оксидом цинка. Представлено сравнение экспериментов, проведенных на аппарате термогравиметрического анализа (ТГА), с результатами компьютерного моделирования.*

*Ключевые слова:* ПГУ в внутрицикловой газификацией, горячая сероочистка, многофазная нестационарная гидродинамика, сорбенты, оксид цинка.

### **Abstract**

*Sorbents on the basis of oxide of zinc are used for cleaning synthesis gas from hydrogen sulfide till 1–20 ppm that is necessary for operation of the gas turbine in steam-gas cycles with IGCC [1, 2]. The computer model including chemical reactions in two-phase disperse streams has been developed for calculation of system of desulphurization of gases in a software package of Ansys Fluent. Modeling of hydrodynamics and chemical reactions in a dense bed of a sorbent is carried out, distribution of volume fractions of phases eventually, change of the field of speeds of phases, distribution of mass fractions of products is received. Averages in the range of temperatures of 300–510 °C kinetic constants of reaction of absorption of hydrogen sulfide by zinc oxide are defined. Comparison of the experiments made on the device of the thermogravimetric analysis (TGA) with results of computer modeling is presented.*

*Keywords:* IGCC, hot desulfurization, multiphase CFD, sorbents, ZnO.

В парогазовых установках с внутрицикловой газификацией твердого топлива остро стоит проблема очистки синтез газов от сероводорода [1–2]. Требуемый диапазон содержания сероводорода в газе 1–100 ppm, что необходимо для бесперебойной работы газовой турбины либо топливных элементов (в зависимости от технологической схемы установки). Экспериментальные данные были получены на термогравиметрическом анализаторе. Численная обработка экспериментальных данных проводилась при помощи пакета Ansys Fluent с использованием объемной кинетической модели и нестационарной многофазной гидродинамики на основе модели сплошных сред. По данным обзоров литературы подобные численные исследования процесса поглощения сероводорода сорбентом на основе оксида цинка марки